

МЕТАЛЛИЗАЦИЯ СИСТЕМОЙ Ti-Cu МЕТАЛЛОМАТРИЧНОГО КОМПОЗИТА AlSiC**А.А. Золотарев, М.М. Крымко, С.В. Миннебаев, В.А. Сидоров**

Алексей Алексеевич Золотарев*, Михаил Миронович Крымко, Станислав Вадимович Миннебаев, Владимир Алексеевич Сидоров

АО «НПП «Пульсар»

Окружной пр., 27, Москва, Российская Федерация, 105187

E-mail: zolotarev_aa@pulsarnpp.ru*, krymko_mm@pulsarnpp.ru, minnebaev_sv@pulsarnpp.ru,

sidorov_va@pulsarnpp.ru

Одним из условий надежности полупроводникового прибора служит качественная металлизация поверхности корпуса прибора для осуществления монтажа кристалла на нее. Существует несколько технологий металлизации металломатричного композита на основе алюминия и карбида кремния с использованием химического и гальванического осаждения никеля, однако данные технологии не дают качественной адгезии слоя металлизации к поверхности металломатричного композита, что затрудняет процесс монтажа полупроводникового кристалла. В статье представлены результаты разработки технологии металлизации корпуса полупроводникового прибора, изготовленного из металломатричного композита на основе алюминия и карбида кремния, при помощи вакуумного осаждения титана и меди. Данная технология используется при изготовлении корпусов из металломатричного композита для последующего монтажа кристаллов на основе широкозонных материалов. Были собраны образцы теплоотводов с основанием из металломатричного композита алюминий-карбид кремния толщиной 4 мм, содержащего 70% частиц карбида кремния. Поверхность образцов была покрыта осажденной в вакууме системой металлизации титан-медь исходя из того, что химическая реакция между осаждаемым металлом и материалом диэлектрика имеет место, если она возможна с точки зрения термодинамики. Были проведены исследования температурного режима осаждения, в результате которых выбран тепловой режим осаждения 300 °С. На покрытых образцах были проведены исследования качества полученного покрытия при помощи электронной микроскопии, а также проведена проверка прочности паянного соединения, позволяющая оценить величину прочности адгезии слоя металлизации к композиту. Значение величины адгезии слоя металлизации по разработанной технологии обеспечивает проведение монтажа полупроводниковых кристаллов к корпусу полупроводникового прибора.

Ключевые слова: GaN - нитрид галлия, металломатричный композит, AlSiC, полевой транзистор с барьером Шоттки

METALLIZATION BY Ti-Cu SYSTEM OF AlSiC METAL MATRIX COMPOSITE**A.A. Zolotarev, M.M. Krymko, S.V. Minnebaev, V.A. Sidorov**

Aleksey A. Zolotarev*, Mikhail M. Krymko, Stanislav V. Minnebaev, Vladimir A. Sidorov

JSC «S&PE «Pulsar»

Okružhnoy proezd, 27, Moscow, 105187, Russia

E-mail: zolotarev_aa@pulsarnpp.ru*, krymko_mm@pulsarnpp.ru, minnebaev_sv@pulsarnpp.ru,

sidorov_va@pulsarnpp.ru

One of the conditions for the reliability of a semiconductor device is a high-quality metallization of the surface of the device body, for mounting the crystal on it. There are several technologies for metallizing a metal matrix composite based on aluminum and silicon carbide using chemical and galvanic deposition of Nickel, but these technologies do not provide high-quality

adhesion of the metallization layer to the surface of the metal matrix composite, which makes it difficult to install a semiconductor crystal. The article presents the results of the development of a technology for metallization of the body of a semiconductor device made of a metal matrix composite based on aluminum and silicon carbide, using vacuum deposition of titanium and copper. This technology is used in the manufacture of metal matrix composite housings for subsequent installation of crystals based on wide-band materials. Samples of heat sinks with a base made of a 4 mm thick aluminum-silicon carbide metal matrix composite containing 70% silicon carbide particles were collected. The surface of the samples was covered with a vacuum-deposited titanium-copper metallization system based on the fact that a chemical reaction between the deposited metal and the dielectric material takes place, if it is possible from the point of view of thermodynamics. Studies of the deposition temperature regime were carried out, as a result of which the thermal deposition regime of 300 °C was selected. The quality of the resulting coating was studied using electron microscopy on the coated samples, as well as the soldered joint strength was checked to assess the strength of the adhesion of the metallization layer to the composite. The value of the adhesion of the metallization layer according to the developed technology ensures the installation of semiconductor crystals to the body of a semiconductor device.

Key words: GaN - gallium nitride, metal matrix composite, AlSiC, HEMT, high-temperature electronic packaging

Для цитирования:

Золотарев А.А., Крымко М.М., Миннебаев С.В., Сидоров В.А. Металлизация системой Ti-Cu металломатричного композита AlSiC. *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2020. Т. 63. Вып. 12. С. 50–56

For citation:

Zolotarev A.A., Krymko M.M., Minnebaev S.V., Sidorov V.A. Metallization by Ti-Cu system of AlSiC metal matrix composite. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.* [Russ. J. Chem. & Chem. Tech.]. 2020. V. 63. N 12. P. 50–56

В настоящее время одними из самых востребованных изделий микроэлектронной промышленности являются полупроводниковые приборы, изготовленные на широкозонных материалах, таких как карбид кремния, нитрид галлия, алмаз и т.д. Интерес к широкозонным полупроводниковым материалам со стороны разработчиков микроэлектроники вызван возможностью снижения потерь и увеличения рабочей частоты устройств на их основе, их высокими значениями напряжения пробоя и рабочей температуры, а также надежностью и радиационной стойкостью. Среди полупроводниковых приборов на широкозонных материалах отдельно стоит выделить устройства на основе нитрида галлия [1-3]. Транзисторы на основе нитрида галлия обладают широкой запрещенной зоной, высоким напряжением пробоя, подвижностью, высокой плотностью мощности и высоким коэффициентом усиления в СВЧ диапазоне. Эти свойства совместно с превосходной теплопроводностью делают устройства на основе GaN пригодными для мощных устройств, работающих на высокой частоте и в широком диапазоне рабочих температур [4-7].

Применение широкозонных материалов в конструкции современных приборов приводит к повышению удельной выделяемой тепловой мощности, что, в сочетании с постоянным уменьшени-

ем геометрических размеров полупроводниковых приборов, ставит перед разработчиками микроэлектронных устройств следующие задачи:

- отвод от малой площади избыточного тепла, вырабатываемого в процессе эксплуатации приборов;
- согласование КТР материалов полупроводниковых приборов;
- применение полупроводниковых приборов в широком диапазоне рабочих температур.

Традиционно-применяемые материалы для изготовления корпусов в микроэлектронике, такие как сплавы на основе меди и алюминия, уже не обеспечивают решение вышеуказанных задач, что заставляет разработчиков вести поиск новых теплопроводящих материалов для использования в конструкции корпусов современных полупроводниковых приборов. На наш взгляд к перспективным материалам можно отнести металломатричные композиты (ММК) [8-12]. В ММК матрицей могут служить такие материалы, как алюминий, магний, титан, никель и их сплавы. Армирующими наполнителями в ММК являются различные типы керамики. Выбор материала матрицы и наполнителя зависит от тех характеристик, которые необходимо получить для решения конкретной задачи. Новый материал должен обладать величиной прочности металлизации, достаточной

для монтажа кристаллов полупроводника на поверхность корпуса [13-17].

Выбор системы металлизации для металломатричного композита основывается на том, что она должна иметь высокое значение адгезии к подложке кристалла, а также она должна обеспечивать возможность пайки низкотемпературными припоями с образованием герметичного паянного шва.

Металлизация вакуумным осаждением металлов на диэлектрик характеризуется образованием двух типов связи, которую образует металл с подложкой. Первый тип возможен, когда напыляемое покрытие образует своеобразную «корневую» систему в подложке, а второй тип имеет место в случае химического взаимодействия напыляемого металла с материалом подложки с образованием промежуточных фазовых слоев.

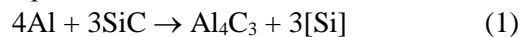
Второй тип связи характеризуется наличием промежуточных фазовых слоев, которые сглаживают напряжения, вызванные, например, различием коэффициентов температурного расширения материалов диэлектрика и металла с напылением [18-20]. В связи с этим система металлизации, химически взаимодействующая с материалом подложки, представляется более эффективной.

Достаточно высокую адгезию металлизации к поверхности диэлектрика можно получить при условии химического взаимодействия материала диэлектрика с осаждаемым металлом. Чтобы химическая реакция между осаждаемым металлом и материалом диэлектрика имела место, необходимо, чтобы она была возможной с точки зрения термодинамики. Реакция между металлом и материалом диэлектрика термодинамически возможна в том случае, если величина изменения теплосодержания ΔH образования материала диэлектрика менее отрицательна, чем величина ΔH образования соединения компонентов диэлектрика с напыляемого металла. При этом выделяется тепло. Теплота образования характеризует степень устойчивости соединения. Если при образовании соединения тепло выделяется, то соединение более устойчиво при механических и термических воздействиях. Только в этом случае металл будет отнимать углерод от карбида кремния и могут образовываться промежуточные фазовые слои.

Первым адгезионным слоем в системе металлизации должен быть металл, имеющий величину теплосодержания ΔH образования соединений напыляемого металла с углеродом и кислородом более отрицательную, чем величины ΔH образования карбида кремния и оксида алюминия.

Таковыми металлами, например, могут быть титан и алюминий, соединения которых имеют следующие величины ΔH образования соединений: Al_4C_3 $\Delta H = -30,9$; Al_2SiO_5 $\Delta H = -642,2$; TiC $\Delta H = -54$; Ti_3O_5 $\Delta H = -587$ более отрицательные, чем у карбида кремния SiC $\Delta H = -26,7$, а Ti_3O_5 $\Delta H = -587$, более отрицательное, чем у оксида алюминия Al_2O_3 $\Delta H = -399,09$.

Согласно работам [21-24], в процессе изготовления металломатричных композитов на основе алюминия и карбида кремния развиваются химические взаимодействия, в результате которых может образоваться карбид алюминия. Взаимодействие алюминия и карбида кремния происходит при температуре более 923 К. Ниже данной температуры взаимодействия не наблюдается даже в течение длительной выдержки образцов. Начало взаимодействия между частицами идет по следующей реакции:



Протекание данной реакции происходит достаточно быстро. Карбид алюминия образуется в образцах, выдержанных в течение 5 мин при температуре 1150 К, в виде темных кристаллов с неравномерным распределением. При достижении температуры реакции в 1270 К и выдержке до 1 ч количество кристаллов карбида алюминия заметно увеличивается.

Увеличение температуры процесса взаимодействия между алюминием и частицами карбида кремния до температуры 1630 К приводит к появлению тройного карбида Al_4SiC_4 по следующей реакции:



В связи с вышесказанным, было принято решение для первого адгезионного слоя использовать титан, так как для образования прочной химической связи с материалом диэлектрика при вакуумном осаждении не требуются дополнительных условий, связанных с обеспечением необходимого температурного режима.

При рассмотрении вопроса о выборе последующих слоев целесообразно исходить из предположения, что каждый слой металла образует с предыдущим некоторую область взаимной растворимости. При этом при любых температурных взаимодействиях практически исключается быстрая диффузия металла первого слоя в подложке, что может уменьшить величину адгезии.

Поскольку осаждение в вакууме достаточно толстых слоев металла является довольно трудоемким и непроизводительным процессом, при

выборе последующих слоев следует использовать гальванопокрытия. Для этого пригодны медь, никель, золото, платина и другие металлы, не образующие прочных окисных пленок, препятствующих электрохимическим процессам.

Если первый осажденный в вакууме металл может хорошо поглощать водород, например, титан, то второе покрытие не должно обладать этим свойством. Такими металлами, например, являются медь и никель. Во многих случаях на поверхность никеля осаждают гальваническое золото, что облегчает сборку приборов.

Выбор температурного режима при магнетронном осаждении основывался на исследовании величины адгезии различных толщин слоев при различных температурах (Т) на гладких поверхностях опытных образцов металломатричного композита в процессе напыления и при различных режимах процесса осаждения металлов. Исследование проводилось на установке магнетронного напыления PVD 250 с безмаслянной откачкой и имеющей ионную пушку для очистки подложек и для напыления с помощью ионных пучков. Измерение величины адгезии металлизации к поверхности металломатричного композита проводили с регистрацией усилия на отрыв при помощи измерительной системы, состоящей из динамометра и электропривода. Результаты измерений приведены в таблице.

Исходя из полученных результатов была разработана следующая технология металлизации металломатричного композита на основе алюминия и карбида кремния: вакуумное осаждение титана слоем в диапазоне от 0,1 мкм до 0,2 мкм и слоя меди от 1 мкм до 2 мкм на поверхность AlSiC при температуре подогрева пластины 300 °С,

гальваническое осаждение меди от 4 мкм до 5 мкм, гальваническое осаждение никеля слоем от 2 мкм до 4 мкм и нанесение эвтектического слоя золота 1-2 мкм. На рис. 1 представлена структурная схема технологического процесса металлизации поверхности металломатричного композита.

Таблица
Величина адгезии металлизации к поверхности композита
Table. The amount of metallization adhesion to the composite surface

Толщина слоев металлизации, мкм				Т, °С	Р, кг/мм ²
Ti	Cu	Ni	Au		
0,06	0,06	3	1,5	180	0,15
				250	0,38
				300	0,68
0,1	0,1			180	0,23
				250	0,76
				300	0,89
0,15	0,15			180	0,27
				250	1,6
				300	2,6
0,15	0,5			250	2,4
				300	3,1
0,15	1			250	2,6
		300	4,2		
0,15	1,5	250	2,7		
		300	4,1		
0,15	2	250	2,5		
		300	4,2		
0,2	2	250	2,6		
		300	4,2		
0,2	2,5	250	2,5		
		300	4,3		
0,2	3	250	2,6		
		300	4,3		



Рис. 1. Технологическая схема металлизации металломатричного композита AlSiC
Fig. 1. Technological scheme of metallization of AlSiC metal matrix composite

По разработанной технологии был покрыт прямоугольный образец металломатричного композита. На рис. 2 представлен опытный образец металломатричного композита с вакуумным осаждением титана и меди, а также гальваническим осаждением меди.

Образец проверялся на качество сцепления в соответствии с ГОСТ 9.302-88 методом нагрева и методом нанесения сетки царапин на поверхность. В результате визуального контроля дефектов поверхности, вздутий, отслаиваний и растрескиваний обнаружено не было.



Рис. 2. Опытный образец AlSiC с металлизацией слоя титана и меди, а также гальваническим осаждением меди

Fig. 2. AlSiC prototype with metallization of the titanium and copper layer, as well as electroplating of copper

Для количественного определения прочности сцепления нанесенного покрытия с материалом образца использовался метод проверки прочности паянного соединения. С этой целью к поверхности с нанесенным покрытием припаиваются металлические стержни Ø 1 мм, к которым затем прикладывается растягивающее усилие, при этом исследуемые образцы неподвижно закреплены.

В случае прямого отрыва разрыв обычно начинается в точке, где локальное напряжение превышает локальную прочность. На рис. 3 представлен образец с припаянными металлическими стержнями.



Рис. 3. Образец с припаянными стержнями

Fig. 3. Sample with soldered rods

Опытный образец материала устанавливался в систему электропривода и динамометра.

В результате проведения измерений на опытном образце произошел отрыв металлических стержней вместе с покрытием – «голый отрыв». Проведенные эксперименты показали, что прочность адгезии составляет от 33 Н/мм² до 35 Н/мм². Полученные данные прочности адгезии слоя металлизации к поверхности металломатричного

ного композита позволяют проводить монтаж кристаллов на поверхность тепловода корпуса, изготовленного из металломатричного композита.

Для проведения исследования структуры слоев металлизации, нанесенной по разработанной технологии, был сделан срез на поверхности опытного образца и получено изображение слоев при помощи электронного микроскопа. Результат исследования структуры среза металлизации представлен на рис. 4.

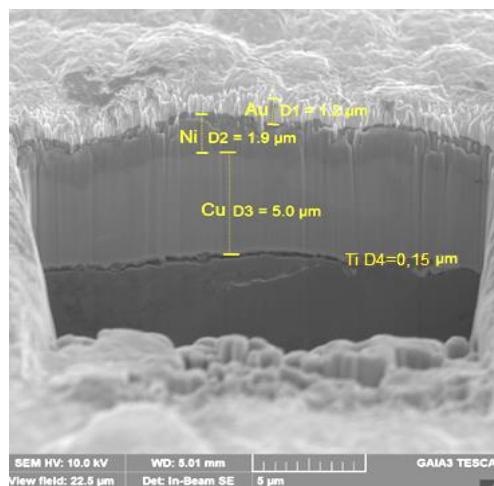


Рис. 4. Срез образца AlSiC с предложенной технологией металлизации

Fig. 4. Cross-section of the AlSiC sample with the proposed metallization technology

На локальном срезе опытного образца выделяется слой меди около 5 мкм, который получен гальваническим осаждением, а также слой никеля около 2 мкм. Нижний слой – это титан-медь, полученный вакуумным осаждением около 1-1,2 мкм при температуре 300 °С.

Полученные данные электронной микроскопии показывают сплошность нанесенного покрытия, а также границы и толщину полученных слоев металлизации. Результаты электронной микроскопии показывают отсутствие на поверхности непокрытых участков, а также выхода частиц карбида кремния, что позволит осуществлять монтаж кристаллов полупроводников на поверхность металломатричного композита.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Komiak, J.J.** GaN HEMT: Dominant Force in High-Frequency Solid-State Power Amplifiers. *Eng. IEEE Microwave Magazine*. 2015. 16(3). P. 97-105. DOI: 10.1109/MMM.2014.2385303.
2. **Куэй Р.** Электроника на основе нитрида галлия. М.: Техносфера. 2011. 587 с.

REFERENCES

1. **Komiak, J.J.** GaN HEMT: Dominant Force in High-Frequency Solid-State Power Amplifiers. *Eng. IEEE Microwave Magazine*. 2015. 16(3). P. 97-105. DOI: 10.1109/MMM.2014.2385303.
2. **Quay R.** Gallium Nitride Electronics. М.: Tekhnosfera. 2011. 587 p. (in Russian).

3. **Meneghesso G., Meneghini M.** Reliability issues of Gallium Nitride High Electron Mobility Transistors. *Internat. J. Microwave and Wireless Technol.* 2010. 2(01). P. 39-50. DOI: 10.1017/S1759078710000097.
4. **Danqiong H., Bilbro G., Trew R.J.** Analytic Model for Conduction Current in AlGaIn/GaN HFETs/HEMTs. *Active and Passive Electron. Comp.* 2012. P. 2-11. DOI: 10.1155/2012/806253.
5. **Kharkovsky S., Zoughi R.** Microwave and millimeter wave nondestructive testing and evaluation - Overview and recent advances. *IEEE Instrument. Measur. Magazine.* 2007. V. 10. Iss. 2. P. 26-38. DOI: 10.1109/MIM.2007.364985.
6. **Wu Y., Moore M., Saxler A., Wisleder T., Parikh P.** 40-W/mm Double Field-plated GaN HEMTs. In: Proc. Device Research Conf. 2006. P. 151-152.
7. **Isaak R., Diaz J., Gerlach M., Hulse J., Schlesinger L.** The First 0.2 μ m 6-Inch GaN-on-SiC MMIC process. In: Proc. CS MANTECH Conf. Denver. 2014. CO. May 19-22.
8. **Kikuchi K., Nishihara M., Yamamoto H., Yamamoto T., Mizuno S., Yamaki F., Sano S.** An 8.5-10.0 GHz 310 W GaN HEMT for radar applications. In: IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig. 2014. P. 1-4.
9. **Iwayama I., Kuwabara T., Nakai Y., Ikeda T., Koyama S., Okamoto M.** New Heat Sink for Railroad Vehicle Power Modules. *Sei Tech. Rev.* 2014. N 78. P. 10-67.
10. **Occhionero M.A., Hay R.A., Adams R.W., Fennessy K.P.** Aluminium Silicon Carbide (AlSiC) for Cost-Effective Thermal Management and Functional Microelectric Packaging Design Solutions. 12th European Microelectronics and Packaging Conference. 1999. P. 10-04.
11. **Nishchev K.N., Novopoltsev M.I.** The Uniformal Metallization of the AlSiC Metal Matrix Composite Material Surface. *J. Surf. Eng. Mater. Adv. Technol.* 2014. 04(04). P. 237-241. DOI: 10.4236/jsemat.2014.44026.
12. **Kablov E.N.** Manufacturing, Properties and Use of Heatsink Bases from MCM Al-SiC in Power Electronics and Convertor Technology. *Aviat. Mater. Technol.* 2012. 2. P. 20-23.
13. **Михеев Р.С.** Алюмоматричные композиционные материалы с карбидным упрочнением для решения задач новой техники. М.: Маска. 2013. 356 с.
14. **Molina J. M., Rheme M., Carron. J., Weber L.** Thermal conductivity of aluminium matrix composites reinforced with mixtures of diamond and SiC particles. *Scripta Materialia.* 2008. 58(5). P. 393 - 396. DOI: 10.1016/j.scriptamat.2007.10.020.
15. **Neelima D.C., Mahesh V., Selvaraj N.** Mechanical characterization of Aluminium silicon carbide composite. *Internat. J. Appl. Eng. Res.* 2011. 1 (4). P. 793-799.
16. **Singla M., Dwivedi D., Singh L., Chawla V.** Development of aluminium based silicon carbide particulate metal matrix composite. *J. Minerals & Materials Characterization & Engineering.* 2009. 8 (6). P. 455-467. DOI: 10.4236/jmmce.2009.86040.
17. **Singh R., Singla E.** Tribological characterization of aluminium-silicon carbide composite prepared by mechanical alloying. *Int. J. Applied Engineering Research.* 2012. 7 (11). P. 1420-1423.
3. **Meneghesso G., Meneghini M.** Reliability issues of Gallium Nitride High Electron Mobility Transistors. *Internat. J. Microwave and Wireless Technol.* 2010. 2(01). P. 39-50. DOI: 10.1017/S1759078710000097.
4. **Danqiong H., Bilbro G., Trew R.J.** Analytic Model for Conduction Current in AlGaIn/GaN HFETs/HEMTs. *Active and Passive Electron. Comps.* 2012. P. 2-11. DOI: 10.1155/2012/806253.
5. **Kharkovsky S., Zoughi R.** Microwave and millimeter wave nondestructive testing and evaluation - Overview and recent advances. *IEEE Instrum. Measur. Magazine.* 2007. V. 10. Iss. 2. P. 26-38. DOI: 10.1109/MIM.2007.364985.
6. **Wu Y., Moore M., Saxler A., Wisleder T., Parikh P.** 40-W/mm Double Field-plated GaN HEMTs. In: Proc. Device Research Conf. 2006. P. 151-152.
7. **Isaak R., Diaz J., Gerlach M., Hulse J., Schlesinger L.** The First 0.2 μ m 6-Inch GaN-on-SiC MMIC process. In: Proc. CS MANTECH Conf. Denver. 2014. CO. May 19-22.
8. **Kikuchi K., Nishihara M., Yamamoto H., Yamamoto T., Mizuno S., Yamaki F., Sano S.** An 8.5-10.0 GHz 310 W GaN HEMT for radar applications. In: IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig. 2014. P. 1-4.
9. **Iwayama I., Kuwabara T., Nakai Y., Ikeda T., Koyama S., Okamoto M.** New Heat Sink for Railroad Vehicle Power Modules. *Sei Tech. Rev.* 2014. N 78. P. 10-67.
10. **Occhionero M.A., Hay R.A., Adams R.W., Fennessy K.P.** Aluminium Silicon Carbide (AlSiC) for Cost-Effective Thermal Management and Functional Microelectric Packaging Design Solutions. 12th European Microelectronics and Packaging Conference. 1999. P. 10-04.
11. **Nishchev K.N., Novopoltsev M.I.** The Uniformal Metallization of the AlSiC Metal Matrix Composite Material Surface. *J. Surf. Eng. Mater. Adv. Technol.* 2014. 04(04). P. 237-241. DOI: 10.4236/jsemat.2014.44026.
12. **Kablov E.N.** Manufacturing, Properties and Use of Heatsink Bases from MCM Al-SiC in Power Electronics and Convertor Technology. *Aviat. Mater. Technols.* 2012. 2. P. 20-23.
13. **Mikheev R.S.** Aluminum matrix composite materials with carbide hardening for solving problems of new technology. М.: Маска. 2013. 356 p. (in Russian).
14. **Molina J. M., Rheme M., Carron. J., Weber L.** Thermal conductivity of aluminium matrix composites reinforced with mixtures of diamond and SiC particles. *Scripta Materialia.* 2008. 58(5). P. 393 - 396. DOI: 10.1016/j.scriptamat.2007.10.020.
15. **Neelima D.C., Mahesh V., Selvaraj N.** Mechanical characterization of Aluminium silicon carbide composite. *Internat. J. Appl. Eng. Res.* 2011. 1 (4). P. 793-799.
16. **Singla M., Dwivedi D., Singh L., Chawla V.** Development of aluminium based silicon carbide particulate metal matrix composite. *J. Minerals & Materials Characterization & Engineering.* 2009. 8 (6). P. 455-467. DOI: 10.4236/jmmce.2009.86040.
17. **Singh R., Singla E.** Tribological characterization of aluminium-silicon carbide composite prepared by mechanical alloying. *Int. J. Applied Engineering Research.* 2012. 7 (11). P. 1420-1423.

18. **Su Y., Ouyang Q., Zhang W., Li Zh., Guo Q., Fan G.** Composite structure modeling and mechanical behavior of particle reinforced metal matrix composites. *Materials Science and Engineering: A*. 2014. V. 597. P. 359–369. DOI: 10.1016/j.msea.2014.01.024.
19. **Loto R.T.** Investigation of the influence of SiC content and particle size variation on the corrosion resistance of Al-SiC matrix composite in neutral chloride solution. *Internat. J. Adv. Manufact. Technol.* 2019. 101(3). P. 2407–2413. DOI: 10.1007/s00170-018-3137-9.
20. **K. Raju** Spray forming of aluminium alloys and its composites: an overview. *J. Mater. Sci.* 2008. N 43. P. 2509-2521. DOI: 10.1007/s10853-008-2464-x.
21. **Ницев К.Н., Новопольцев М.И., Беглов В.И., Гришанин А.В., Сигачев А.Ф., Лютова Е.Н.** Влияние термообработки на адгезионную прочность металлического покрытия на поверхности металломатричного композита AlSiC. *Изв. вузов. Поволж. рег. Физ.-математ. науки.* 2019. № 2 (50). С. 98-110. DOI: 10.21685/2072-3040-2019-2-9.
22. **Lee J.C.** Control of the interface in SiC/Al composites. *Scripta Materialia*. 1999. V. 41. N 8. P. 895 – 900. DOI: 10.1016/S1359-6462(99)00227-4.
23. **Carim A.H.** SiC/Al₄C₃ interfaces in aluminum - silicon carbide composites. *Mater. Lett.* 1991. N12. P. 153-157. DOI: 10.1016/0167-577X(91)90164-2.
24. **Чернышова Т.А.** Взаимодействие металлических расплавов с армирующими наполнителями. М.: Наука. 1993. 272 с.
18. **Su Y., Ouyang Q., Zhang W., Li Zh., Guo Q., Fan G.** Composite structure modeling and mechanical behavior of particle reinforced metal matrix composites. *Materials Science and Engineering: A*. 2014. V. 597. P. 359–369. DOI: 10.1016/j.msea.2014.01.024.
19. **Loto R.T.** Investigation of the influence of SiC content and particle size variation on the corrosion resistance of Al-SiC matrix composite in neutral chloride solution. *Internat. J. Adv. Manufact. Technol.* 2019. 101(3). P. 2407–2413. DOI: 10.1007/s00170-018-3137-9.
20. **K. Raju** Spray forming of aluminium alloys and its composites: an overview. *J. Mater. Sci.* 2008. N 43. P. 2509-2521. DOI: 10.1007/s10853-008-2464-x.
21. **Nishchev K., Novopoltsev M., Beglov V.** The effect of heat treatment on adhesive strength of metal coating on the surface of alsic metal-matrix composite. *Izv.Vuzov. Povolzh. Reg. Fiz. Matem.Nauki.* 2019. N 2 (50). P. 98-110 (in Russian). DOI: 10.21685/2072-3040-2019-2-9.
22. **Lee J.C.** Control of the interface in SiC/Al composites. *Scripta Materialia*. 1999. V. 41. N 8. P. 895 – 900. DOI: 10.1016/S1359-6462(99)00227-4.
23. **Carim A.H.** SiC/Al₄C₃ interfaces in aluminum - silicon carbide composites. *Mater. Lett.* 1991. N12. P. 153-157. DOI: 10.1016/0167-577X(91)90164-2.
24. **Chernyshova T.A.** Interaction of metal melts with reinforcing fillers. М.: Nauka. 1993. 272 p. (in Russian).

Поступила в редакцию 07.10.2020
Принята к опубликованию 20.10.2020

Received 07.10.2020
Accepted 20.10.2020